

拼焊板弯曲回弹的理论研究与试验研究*

姜银方 袁国定 杨继昌 汪建敏

(江苏大学机械工程学院 镇江 212013)

朱元右

(南京工程学院机械工程系 南京 211100)

摘要：在平断面假设、纯弯曲假设、拼焊板不考虑焊缝等一系列较为合理的假设条件下，推导了拼焊板弯曲回弹解析模型。推导考虑材料有指数硬化特性和中性层的移动及应力应变中性层的不重合性等问题，但没有考虑包辛格效应的影响和中性层的转动问题。针对这个弯曲回弹公式，编程计算差厚(1.6 mm/0.8 mm)拼焊板的回弹值，并采用 75 °V 形自由弯曲试验进行了验证；对拼焊板的弯曲回弹进行了理论分析，提出了拼焊板相对弯曲半径的概念。

关键词：拼焊板 弯曲 回弹

中图分类号：TG386

0 前言

拼焊板(Tailor-welded blanks, TWBs)技术是将两块或两块以上的板料，采用焊接方法拼在一起，然后进行冲压成形。这些板料，可以具有不同的厚度、性能、材质和表面涂层^[1,2]。

采用拼焊板技术，其冲压过程中存在如：破裂、起皱^[3-5]和回弹^[6-10]等问题，其中回弹最难控制，因为涉及到回弹量的准确预测。回弹问题的存在会影响冲压件的形状精度和表面质量。目前对轿车装配质量的要求越来越高，这无形中增加了对冲压件成形精度的要求。近年来，高强度钢板、铝合金薄板及其 TWBs 在汽车车身制造中得到大量应用。高强度钢、铝合金与普低钢有很大差异，导致冲压件产生很大的回弹量，并且由于拼焊板二基板强度等性能或厚度差的存在，拼焊板的回弹问题^[9, 10]与光板相比还有其特殊性。拼焊板的回弹问题不仅来自传统板料冲压回弹，还与拼焊板二基板的性质差异、焊缝和 HAZ 的材料性质的改变、焊缝的移动^[2]等有关，使回弹分析更为复杂、控制更为困难。

以下拟推导拼焊板弯曲回弹公式，并进行试验验证，由此讨论影响拼焊板弯曲回弹的各因素。

1 拼焊板弯曲回弹分析模型

这里的拼焊板由两块厚度不同但材质完全一样的薄板焊接而成，焊缝呈纵向分布，板料为条形件。

根据仿真和试验的结果^[10]，证明当板条达到一定宽度时，焊缝对拼焊板弯曲回弹的影响就很小，所以拼焊板弯曲回弹分析模型不考虑焊缝，假设模型为两块厚度不同的板料的几何联接，并且板料的几何中心重合，从而减少拼焊板弯曲过程中板料中性层的转动给分析问题带来的困难。拼焊板模型见图 1， d_1 和 d_2 为板和板的厚度， b 为各板的宽度，分析模型假设板和板的宽度相等。板料弯曲轴线与焊缝垂直，图 1 中的 M 为弯矩。弯曲过程在凸模和凹模中进行，为自由弯曲，板料厚薄二边与模具接触并为自然接触状态，不施加附加外力。拼焊板所用板料为各向同性，具有加工硬化特性。

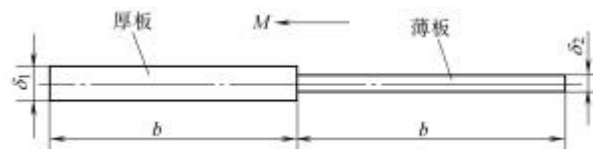


图 1 拼焊板简化分析模型(横断面)

由于影响回弹的因素错综复杂，为了分析问题的方便起见，作如下合理假设：板料变形前后遵循 Euler - Bernoulli 平断面假定；拼焊板只有弯矩的作用，为纯弯曲；板料宽度方向的变形忽略不计，变形区为平面应变状态^[10]；变形区的等效应力 $\bar{\sigma}$ 和等效应变 $\bar{\epsilon}$ 之间的关系与单向拉伸时应力应变关系完全一致。

2 拼焊板的弯曲过程与中性层

板料在弯曲过程中，随着外加弯曲力矩的逐步增大，弯曲变形程度随之增大，板料经过从弹性变形、弹塑性变形到塑性变形三个阶段。在弯曲过程

* 江苏省自然科学基金(BK2002009)和国家自然科学基金(50475125)资助项目。20050108 收到初稿，20050717 收到修改稿

中，沿板料厚度以应力中性层为界划分为拉伸变形区与压缩变形区，随着弯曲力矩的继续增大，外层与内层材料部分进入塑性变形状态，而后塑性变形逐步往应力中性层扩展。沿板料厚度以应力达到屈服极限的层次为界线划分为弹性变形区与塑性变形区(图 2)。当弯曲件的相对弯曲半径很小时，由于变形程度很大，可以近似地认为塑性变形已经扩展到整个横剖面。此时径向应力 s_r 与横向应力 s_b 已不能忽略不计。汽车结构中的板金零件一般具有一定的宽度，在最大主应力 s_q 的作用下，由于横向相邻材料的阻挡限制横向产生应变，故横向应变为零，因而在拉伸变形区引起横向拉应力 s_b 。这里只考虑塑性变形扩展到整个横断面的情况。

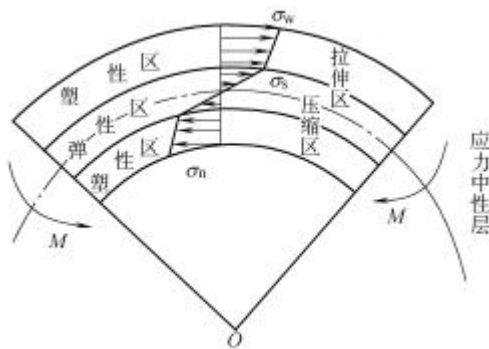


图 2 弹塑性弯曲的应力分布

对于拼焊板来说，由于存在焊缝、板厚差等，焊缝区和板厚变化区的应力较为复杂，存在附加力，为了分析问题的方便，这里作了简化，当拼焊板板宽较大时，焊缝及拼缝处的附加力可以忽略，关于这一点仿真结果可以得到证实^[10]。为此把组成拼焊板的二块板分开进行考虑，以下是板料弯曲中性层的分析。

根据在中性层的径向应力 s_r 互相平衡的条件，当 $r = r_s$ 时，内层径向应力 s_{ri} 应与外层径向应力 s_{ro} 相等，即可求得应力中性层曲率半径

$$r_s = \sqrt{Rr} \tag{1}$$

根据弯曲前后金属体积不变求得应变中性层的曲率半径(不考虑材料变薄系数)

$$r_e = (R^2 - r^2)/2d \approx (R+r)/2 \tag{2}$$

可见应力中性层与应变中性层不重合，应力中性层比应变中性层向内移动更多(图 3)。由以上计算结果知道，应力中性层向内移动，扫过的区域经过了先受压后受拉的变化过程，存在着加载过程中的塑性卸载过程。这个问题在前面的应力应变的计算时，并没有考虑，也即没有考虑 Bauschinger 效应的影响。

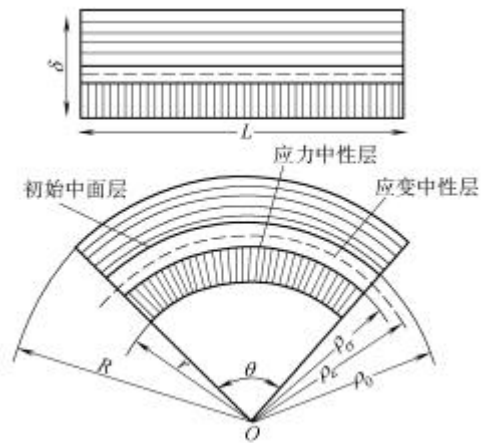


图 3 各中性层的位置

对于拼焊板来说，中性层将与板的二部分中心线不重合，也不平行，拼焊板在弯曲时其中性层将发生平移，并产生转动。这些关系可以通过弹塑性边界上的应力连续性条件和断面的整体平衡条件而推导出来。根据以上的公式知道，应力中性层曲率半径 r_s 和应变中性层曲率半径 r_e 都与板厚有关，把拼焊板不同厚度的二部分分开考虑，则这二部分中性层的移动距离将不同，所以，从整体看弯曲时拼焊板的中性层也将产生转动。

3 拼焊板弯曲时的主应力和弯矩

板料在弯曲时，弯角处随弯曲半径和弯角的不同而处于的弯曲阶段不同，在这里限于篇幅只对宽板的塑性弯曲进行分析。

如图 3 所示，弯曲应力中性层位置或曲率半径为 r_s ，应变中性层为 r_e ，外径为 R ，内径为 r ，弯曲角为 θ 。假设弯曲为平面应变状态；弯曲变形前后体积不变，载荷为塑性变形稳定加载，变形体处于主动变形过程，中途不出现卸载过程，主应力差与主应变差值成一定比例；材料为各向同性；遵循 Mises 屈服准则；并且等效应力 \bar{s} 与等效应变 $\bar{\epsilon}$ 有指数硬化关系。由此求得板料塑性弯曲时外层和内层纤维的三个主应力值及其变化规律如下 (s_{ri} 、 s_{qo} 、 s_{bi} 、 s_{bo} 略)

$$s_{qo} = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n+1} K \left\{ \left(\frac{1}{n+1}\right) \left[\left(\ln \frac{r}{r_s}\right)^{n+1} - \left(\ln \frac{R}{r_s}\right)^{n+1} \right] + \left(\ln \frac{r}{r_s}\right)^n \right\} \tag{3}$$

$$s_{qi} = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n+1} K \left[\left(\frac{1}{n+1}\right) \left[\left(-\ln \frac{r}{r_s}\right)^{n+1} - \left(\ln \frac{r}{r_s}\right)^{n+1} \right] + \left(\ln \frac{r}{r_s}\right)^n \right] \quad (4)$$

式中 K ——材料强度系数
 n ——硬化指数

设拼焊板为同种材质,原始中面在同一平面上,拼焊板的和板料弯曲后的内外曲率半径分别为 R_1 、 r_1 和 R_2 、 r_2 , d_1 和 d_2 是拼焊板的各部分的厚度, M_1 和 M_2 分别是拼焊板的和板料弯曲时所产生的弯矩,在这里,忽略了在拼焊板二不同厚度板的交界处因板厚不同而增加的附加力,忽略了拼焊板中性层的转动,计算切向应力 s_q 形成的弯矩

$$M_{1,2} = \int_r^R s_q r d'r = \int_r^{r_s} s_{qi} r d'r + \int_{r_s}^R s_{qo} r d'r = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n+1} d'K \left[\frac{1}{n+1} \int_r^{r_s} r \left(-\ln \frac{r}{r_s}\right)^{n+1} dr - \frac{1}{n+1} \int_r^{r_s} r \left(-\ln \frac{r}{r_s}\right)^n dr - \int_r^{r_s} r \left(-\ln \frac{r}{r_s}\right)^n dr \right] + \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n+1} d'K \left[\frac{1}{n+1} \int_{r_s}^R r \left(\ln \frac{r}{r_s}\right)^{n+1} dr - \frac{1}{n+1} \int_{r_s}^R r \left(\ln \frac{r}{r_s}\right)^n dr + \int_{r_s}^R r \left(\ln \frac{r}{r_s}\right)^n dr \right] \quad (5)$$

式中 $M_{1,2}$ ——板料或板料作用的弯矩

s_{qi} , s_{qo} ——内外层的切向主应力
 d' ——拼焊板二基板各自的板料厚度

式(5)用换元法和级数展开进行积分,级数展开式为

$$\begin{cases} \exp(2I) = 1 + 2I + \frac{(2I)^2}{2!} + \frac{(2I)^3}{3!} + \dots \approx 1 + 2I + 2I^2 \\ I = I_1 \text{ 或 } -I_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中 I, I_1, I_2 ——中间变量

设 $S = \ln R/r_s = -\ln r/r_s = \ln \sqrt{R/r}$, 把式(5)积分并整理后得到

$$M_{1,2} = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n+1} \frac{d'K}{n+1} S^{n+1} \left[\left(\frac{4S^3}{n+4} + \frac{4n+6}{n+2} S\right) r_s^2 - \frac{1}{2}(R^2 - r^2) \right] \quad (7)$$

考虑 $4S^3/(n+4)$ 项相对较小而舍去,所以拼焊板在弯曲方向上产生的总弯矩 M 为

$$M = M_1 + M_2 = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n+1} \frac{d'K}{n+1} \left\{ S_1^{n+1} \left[\frac{4n+6}{n+2} S_1 r_{s_1}^2 - \frac{1}{2}(R_1^2 - r_1^2) \right] + S_2^{n+1} \left[\frac{4n+6}{n+2} S_2 r_{s_2}^2 - \frac{1}{2}(R_2^2 - r_2^2) \right] \right\} \quad (8)$$

式中 $S_1 = \ln R_1/r_{s_1} = \ln r_{s_1}/r_1 = \ln \sqrt{R_1/r_1}$
 $S_2 = \ln R_2/r_{s_2} = \ln r_{s_2}/r_2 = \ln \sqrt{R_2/r_2}$
 r_{s_1}, r_{s_2} ——单独考虑板、板时回弹前应力中性层曲率半径

4 拼焊板的塑性弯曲回弹

根据弹性力学,拼焊板弯曲件的曲率变化量为

$$k = \frac{1}{r_s} - \frac{1}{r'_s} = \frac{M}{EI} \quad (9)$$

式中 E' ——广义弹性模量

r_s ——拼焊板回弹前应力中性层曲率半径

r'_s ——拼焊板回弹后应力中性层曲率半径

I ——拼焊板的断面惯性矩

$$I = d'(d_1^3 + d_2^3)/12$$

$$E' = E/(1 - m^2)$$

m ——板料泊松比

把以上二式和式(8)代入式(9),整理得

$$k = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n+1} \frac{12(1 - m^2) K}{(d_1^3 + d_2^3) E n+1} \times \left\{ S_1^{n+1} \left[\frac{4n+6}{n+2} S_1 r_{s_1}^2 - \frac{1}{2}(R_1^2 - r_1^2) \right] + S_2^{n+1} \left[\frac{4n+6}{n+2} S_2 r_{s_2}^2 - \frac{1}{2}(R_2^2 - r_2^2) \right] \right\} \quad (10)$$

假设板料回弹前后的中性层长度不变,参照图3,由此可得

$$\Delta q = q r_s (1/r_s - 1/r'_s) = q r_s \Delta k \quad (11)$$

把式(10)代入式(11),则拼焊板弯曲角回弹量

$$\Delta q = q r_s \Delta k =$$

$$\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n+1} \frac{12(1 - m^2) K q}{(d_1^3 + d_2^3) E n+1} r_s \times \left\{ S_1^{n+1} \left[\frac{4n+6}{n+2} S_1 r_{s_1}^2 - \frac{1}{2}(R_1^2 - r_1^2) \right] + S_2^{n+1} \left[\frac{4n+6}{n+2} S_2 r_{s_2}^2 - \frac{1}{2}(R_2^2 - r_2^2) \right] \right\} \quad (12)$$

设 $r_{s_1}/r_s \approx r_{s_2}/r_s \approx 1$, 相对弯曲半径

$$x = \frac{r_s}{\sqrt[3]{(d_1^3 + d_2^3)/2}} \quad (13)$$

则拼焊板弯曲角回弹量

$$\Delta q = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{n+1} \frac{6(1-m^2) Kq}{E} x^3 \times \left\{ S_1^{n+1} \left[\frac{4n+6}{n+2} S_1 - \frac{1}{2r_{s_1}^2} (R_1^2 - r_1^2) \right] + S_2^{n+1} \left[\frac{4n+6}{n+2} S_2 - \frac{1}{2r_{s_2}^2} (R_2^2 - r_2^2) \right] \right\} \quad (14)$$

5 计算和试验结果

针对式(14)用 C 语言编程计算了凸模圆角半径 r_p 为 0.75 mm/3.00 mm/5.00 mm/10.00 mm，弯曲角 q 为 75° ，拼焊板板厚(d_1/d_2)有 1.6 mm/0.8 mm(Type A)、1.4 mm/0.8 mm、1.2 mm/0.8 mm (Type B)、1.0 mm/0.8 mm，光板板厚为 0.8 mm(Type C)，板宽为 60 mm。材料参数见下表。计算结果见图 5~7。

表 材料参数

弹性模量 E/GPa	泊松比 m	屈服点 S_s/MPa	强化系数 K/MPa	硬化指数 n
206	0.3	270	677	0.219

为了验证计算结果的有效性，设计了一套弯曲角为 75° 的弯曲模(图 4)，对 Type A 拼焊板(1.6 mm/0.8 mm)进行了不同凸模圆角半径下的自由弯曲试验，并用角度测量仪测量了其回弹角，结果见图 5、6。

结果表明试验与理论有较大的相关度，在弯曲半径较小时，数据统计分析表明置信度大于 95%，说明以上的假设和理论推导的解析模型是正确的，与实际情况是相符合的。但是在弯曲半径较大时，试验与理论稍有差距(图 5、6)，关于这一点可能与模

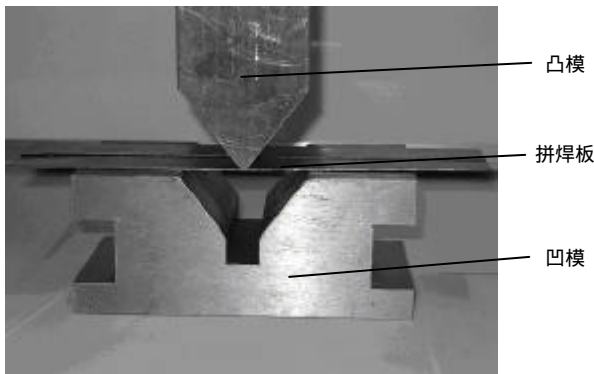


图 4 75° 弯曲模及拼焊板

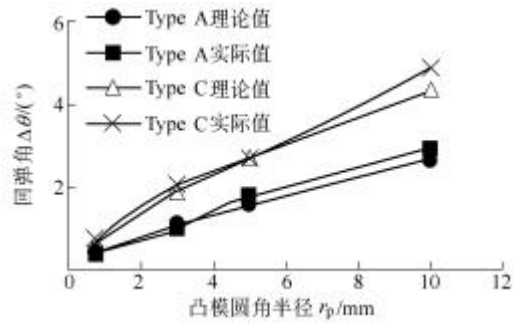


图 5 不同凸模圆角半径对回弹的影响

型推导过程中采用纯塑性弯曲假设有关，推导过程忽略完全弹性区。试验与理论结果还表明，不同凸模圆角半径对回弹的影响(图 5)与板型关系很大，特别是在半径较大时，不同的拼焊板的回弹角差异较大。如果采用式(13)的相对弯曲半径的概念，回弹角与相对弯曲半径的关系受拼焊板板型的影响相对较小(图 6、7)。

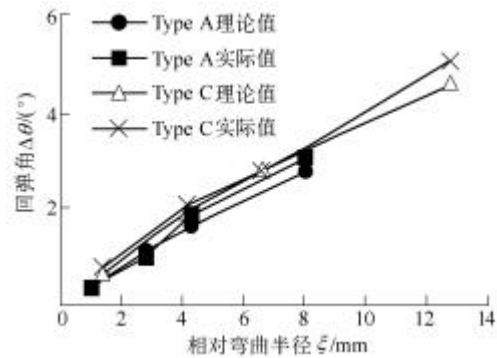


图 6 相对弯曲半径与回弹角的关系

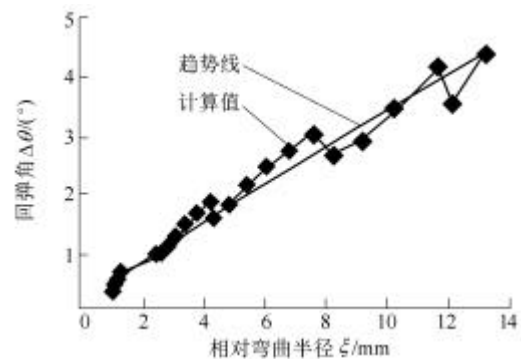


图 7 相对弯曲半径与回弹角的理论计算结果

6 结论

(1) 采用的假设是可行的，推导的回弹解析式是符合实际的。但对于弯曲半径较大的弯曲，理论与实测误差相对要大一些。

(2) 由式(14)可见，拼焊板的 K 、 E 、 n 等大小对回弹值的影响与普通薄板一样。

(3) 拼焊板弯曲的相对弯曲半径可用 Δq 来表示, 相对弯曲半径 愈大 Δq 愈大; 相对弯曲半径 在一定程度上反映了曲率和板厚对回弹的影响。当然回弹还受拼焊板厚差的影响, 图 7 中曲线的台阶是拼焊板板型的变化而引起。

(4) 对于拼焊板来说, 中性层将与板的二部分中心线不重合, 也不平行, 拼焊板在弯曲时其中性层将发生平移, 并产生转动。

(5) 影响弯曲回弹量的因素有多种, 对拼焊板来说, 以上的公式推导中, 焊缝的材料性能的变化, 焊缝的几何形状和位置, 焊接应力, 差厚板结合处在弯曲时的应力集中都没有加以考虑。公式没有反映板宽对回弹的影响, 如果二基板板宽不等, 板宽也是很重要的因素。

参 考 文 献

- 1 Steven A. Steel cars face a weighty decision. Mechanical Engineering, 1997, 119(2) : 56 ~ 61
- 2 姜银方, 杨继昌, 陈炜. 拼焊板冲压成形研究现状与进展. 汽车工程, 2003, 25(4) : 410 ~ 414
- 3 Baysore J K. Laser beam welding and formability of tailored blanks. Welding Journal (Miami, Fla), 1995, 74 (10) : 345 ~ 354
- 4 Saunders F I, Wagoner R H. Forming of tailor-welded blanks. Metallurgical and Materials Transactions A : Physical Metallurgy and Materials Science, 1996, 27(9) : 2 605 ~ 2 616
- 5 Shi M F, Pickett K M, Bhatt K K. Formability issues in the application of tailor welded blank sheets. SAE Special Publications, 1993, 93(0278) : 27 ~ 35
- 6 Sung H C, Young M H, Dae G S. Springback characteristics of the tailor-welded strips in U-draw bending. In : NUMIS-HEET' 2002, Korea, 2002 : 183 ~ 187
- 7 Zhao K M, Chun B K, Lee J K. Finite element analysis of tailor-welded blanks. Finite Elements in Analysis and Design, 2001, 117(37) : 118 ~ 130
- 8 Xiao Z. Numerical prediction of springback in U-channel forming of aluminum tailor welded blanks : [PhD Dissertation]. Ottawa, Canada : Carleton University, 1999
- 9 Jiang Y F, Yang J C. Study on the characteristic of springback in U-Channel forming of tailor welded blanks. In : Proceeding of the 11th International Manufacturing Conference in China, Jinan, 2004, 6 : 63
- 10 姜银方. 拼焊板 U 形件弯曲成形回弹特性研究 : [硕士学位论文]. 镇江 : 江苏大学, 2004

SPRINGBACK IN THE BENDING OF TAILOR WELDED BLANKS IN THEORY AND EXPERIMENT

Jiang Yinfang Yuan Guoding

Yang Jichang Wang Jianmin

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

Zhu Yuanyou

(Department of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211100)

Abstract : By simulations and experiments, a series of proper consumptions are confirmed about flat section, pure bending, neglect of weld line, etc. The bending of tailor-welded blanks is analyzed and the mathematical model of the springback in the bending of tailor welded blanks is deduced with exponential harden , pure plastic bending, the movement of neutral layer , the non-coincidence of the neutral layer between stress and strain. But in the deduction, the Bauschinger effect and the rotation of neutral layer are neglected. The springback angle of tailor-welded blank with thickness ratio 2(1.6/0.8 mm) is calculated for this analytical model and verified by free bending experiment. With the analysis of bending springback, the idea of relative bending radius of tailor-welded blanks is put forward.

Key words : Tailor-welded blanks Bend Springback

作者简介:姜银方,男,1962年出生,硕士,副教授。主要研究方向为塑性加工及理论、模具等。

E-mail : yfjiang@ujs.edu.cn